

文章编号: 1000-7598 (2012) 02-0515-09

地震力作用下基覆边坡模型试验研究

赵安平^{1,2}, 冯 春¹, 李世海¹, 艾 畅¹, 刘 洋¹

(1.中国科学院 力学研究所, 北京 100190; 2.中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘 要: 以汶川灾区实地考察资料为背景, 选择宇宫庙滑坡为参照, 制作了模型试验台, 在量纲分析的基础上, 对主要参数做了相似理论研究, 并采用水下爆炸的方式来模拟地震波(近场)进行了大量模型试验。结果表明: 基覆边坡在地震力作用下的破坏模式是浅表层张拉而导致表层松散体流坍, 且地震加速度随着药量(地震烈度)的增加而呈递增趋势, 重力墙、桩板墙等支挡结构对于基覆边坡的作用明显。其结论将为铁路、公路沿线的高陡边坡分析和研究提供一定的依据。

关 键 词: 水下爆炸; 基覆边坡; 桩板墙; 重力式挡土墙; 加速度; 土压力; 地震烈度

中图分类号: TU 457 **文献标识码:** A

Experimental research on seismic failure mode and supporting for slope of bedrock and overburden layer

ZHAO An-ping^{1,2}, FENG Chun¹, LI Shi-hai¹, AI Chang¹, LIU Yang¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Geology & Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: According to the site investigation of Wenchuan disaster area's statistics data as the background, the experiment model is made selecting Yugongmiao slope as the reference. The similarities of main parameters are analyzed based on dimensional analysis. The underwater blasting is used to simulate seismic wave (near-field), and a large number of model tests are conducted. The results show that the failure model of bedrock and overburden layer slope under seismic loading is surface loose media flowing caused by the tension of superficial layer, and with the increase of explosives (seismic intensity), seismic accelerations increase. It is very useful to design of gravity retaining wall and pile-wall structures. These conclusions can provide some bases for analysis and research of high-steep slopes along railways and highways.

Key words: underwater blasting; bedrock and overburden layer slope; pile wall; gravity retaining wall; acceleration; soil pressure; seismic intensity

1 引 言

地震诱发的边坡破坏是主要的地震次生灾害之一, 在山区和丘陵地带, 地震诱发的滑坡往往具有分布广、数量多、危害大的特点。5.12 汶川大地震诱发了大量的滑坡, 造成了巨大的经济损失和人员伤亡。据统计, 汶川地震滑坡造成的次生灾害损失约占整个地震损失的 1/3^[1]。

地震荷载作用下的边坡稳定性问题一直是岩土工程界学者关注的难题之一^[2]。目前, 国内外的地震模型试验方法主要有离心机振动台试验、振动台试验及爆破模型试验。离心机振动台试验^[3-5]的

特点是可以在 ng 的作用下满足重力相似, 从而使模型与原型的应力、应变相等、变形相似且破坏机制相同, 能够再现原型的特性。但离心机振动台试验费用较高, 且不能模拟高频率、大振幅; 振动台试验^[6-17]不仅很难达到试验所需要的高烈度, 而且无法保证重力相似。爆破模型试验^[18-20]是一种利用爆炸地震波模拟自然地震波来研究边坡模型在地震波作用下的破坏机制的有效方法。由于爆炸波的频率较高(一般在几百 Hz), 并且可以通过调整药量来对产生的模拟地震波进行有效控制, 从而设计出不同频谱、幅值和持续时间的对应于不同地震烈度的等价人工合成地震的地面运动, 于是人们逐渐对

收稿日期: 2010-08-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目资助(No. 2010CB731500); 国家自然科学基金重点项目资助(No. 10632100); 青年科学基金项目资助(No. A020209)。

第一作者简介: 赵安平, 男, 1982年生, 博士, 主要从事岩土工程、地质工程和结构工程方面的研究工作。E-mail: zhaoanping0205@163.com

此类方法产生兴趣。

鉴于离心机振动台等方式无法同时实现模型的高频率、大振幅的地震响应，且费用较高，而爆炸地震波波形与天然地震波形较为一致，可较好地进行天然地震的模拟，同时解决了振动台边坡模型试验遇到的相似律问题。为此，本文主要以汶川灾区宇宫庙滑坡（基岩与厚覆盖层滑坡，下文简称为基覆）为原型，利用动力强度折减法结合相似律的概念制作了边坡模型试验台，以导爆索为爆源，用“水下爆炸”的方式来模拟近场地震，以高能量脉冲运动为特征，纵波（P波）为主要影响因素，观察边坡在冲击荷载作用下的破坏模式并分析其波形图及相关的参数，进而研究施加支挡结构对边坡稳定性的作用，为类似边坡的设计施工起到了重要的指导作用。

2 滑坡模型设计

2.1 量纲分析

(1) 参量选择

根据量纲分析^[21]的基本原理，爆炸作用下发生滑坡的主要参数应包括：

①几何尺度：尺寸 L ；②物理力学参数：密度 ρ 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、弹性模量 E 、泊松比 μ 、振动的持续时间 t 、地震波波速 v 、坡体表面的特征加速度 a 、特征抗拉强度 σ_t 、特征频率 f 等。

(2) 参量分析

对模型材料进行分析，若动土压力为 $F_1 = \rho p v$ ，静止土压力 $F_2 = \rho g h$ ，其中 p 表示纵波波速，在基覆边坡中约为 $500 \sim 1\,500$ m/s，取平均值 $1\,000$ m/s； v 为地震波波速，约为 $0.05 \sim 0.35$ m/s，取 0.2 m/s； g 为重力加速度； h 为坡体被抬起的高度，约为 $1 \sim 3$ m，取 2 m（数据来自中国地震烈度表及汶川地震调查结果），则 $\frac{F_1}{F_2} = \frac{\rho p v}{\rho g h} = \frac{p v}{g h} = \frac{1\,000 \times 0.2}{9.8 \times 2} = 10$ 。

由此可见，地震波产生的动土压力远大于静止土压力，故该试验在爆炸瞬间不考虑坡体自重的影响，则原型与模型之间应满足的相似关系为

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{aL}{v^2}\right)_m &= \left(\frac{aL}{v^2}\right)_o, \left(\frac{v}{Lf}\right)_m = \left(\frac{v}{Lf}\right)_o, \left(\frac{vt}{L}\right)_m = \left(\frac{vt}{L}\right)_o \\ \left(\frac{at}{v}\right)_m &= \left(\frac{at}{v}\right)_o, (\varphi)_m = (\varphi)_o, (\mu)_m = (\mu)_o, \\ \left[\frac{\rho(a/f)v}{\sigma_t}\right]_m &= \left[\frac{\rho(a/f)v}{\sigma_t}\right]_o, \left[\frac{\rho(a/f)v}{C}\right]_m = \left[\frac{\rho(a/f)v}{C}\right]_o \end{aligned} \right\} (1)$$

式中： m 为模型； o 为原型。

2.2 相似理论

根据汶川地震调查筛选出的典型边坡——宇宫庙基覆边坡的基本特征及模型材料如下：

(1) 粉质黏土，浅黄色-灰黑色，可塑，刀切面较光滑，摇震反应轻微。干强度中等，韧性差，含有粉砂岩块碎石，最大块径大于 130 mm，一般粒径为 $20 \sim 50$ mm，稍湿稍密。滑坡前部分布较薄，中部和后部地带较厚，揭露层厚 $3.0 \sim 16.7$ m。

(2) 碎石土，杂色，母岩成份为泥灰岩块碎石，充填物为粉质黏土及角砾，碎石粒径 $20 \sim 200$ mm，含量约占 53% ，块石块径约 $200 \sim 350$ mm，最大块径为 400 mm，含量约占 20% ，稍湿稍密，揭露厚度 $4.1 \sim 12.8$ m。

(3) 泥灰岩块石（上部夹有砂岩），夹有少量黏土，黄灰色，最大块石块径为 300 mm，一般块径为 $50 \sim 100$ mm，含有少量碎石，粒径为 $20 \sim 30$ mm，裂隙发育，主要分布在滑坡后部，厚度较薄，揭露厚度为 $0 \sim 4.4$ m。

该滑坡堆积体物质组成在垂向上变化较大，物质呈不均匀分布，但滑坡堆积上部以粉质黏土为主，下部以碎石土为主。其主要破坏形式为表层滑移。

根据模型制作的可行性，本试验边坡高度选定为 57.5 m，坡度为 45° ，密度取平均值 2.0 g/cm³，弹性模量为 400 MPa，S波波速为 600 m/s，P波波速为 $1\,000$ m/s，坡体材料的抗拉强度为 2.5 kPa，黏聚力 15 kPa，内摩擦角为 30° 。研究的地震烈度范围为 VI-X（加速度峰值为 $0.45 \sim 14.1$ m/s²，具体见表 1），频率为 $1 \sim 10$ Hz，持时为 $10 \sim 30$ s。

表 1 中国地震烈度表（GB/T 17742-1999）（截选）
Table 1 China earthquake intensity (GB/T 17742-1999)(cut-off selection)

地震烈度	水平地震	加速度峰值 / (m/s ²)
VI	0.63	0.45~0.89
VII	1.25	0.90~1.77
VIII	2.50	1.78~3.53
IX	5.00	3.54~7.07
X	10.00	7.08~14.1

根据试验的可行性，采用几何缩比为 25 ，基覆边坡的覆盖层采用工程砂进行模拟，重力式挡土墙采用加气混凝土块进行模拟，桩板墙采用加气混凝土块及塑料扣板进行模拟。加气混凝土块及工程砂的物理力学参数如表 2 所示。

表 2 模型材料物理力学参数
Table 2 Physico-mechanical parameters of model materials

类别	密度 /(g/cm ³)	纵波波速 /(m/s)	黏聚力 /kPa	弹性模量 /MPa	内摩擦角 /(°)
加气混凝土	0.7	1 800	100	2 200	40
工程砂	1.8	105	0	20	30

因此，根据相似材料的力学参数^[22-25]， $v = \sqrt{E/\rho}$ ，基覆边坡需要满足的相似率为

①地震 3 要素：

振动加速度：

$$(a)_m = 1.40(a)_o \quad (2)$$

振动频率：

$$(f)_m = 6.00(f)_o \quad (3)$$

振动持时：

$$(t)_m = 0.17(t)_o \quad (4)$$

②其他参数：

几何尺寸：

$$(L)_m = 0.04(L)_o \quad (5)$$

密度：

$$(\rho)_m = 0.90(\rho)_o \quad (6)$$

地震波波速：

$$(v)_m = 0.24(v)_o \quad (7)$$

抗拉强度：

$$(\sigma_t)_m = 0.05(\sigma_t)_o \quad (8)$$

黏聚力：

$$(c)_m = 0.05(c)_o \quad (9)$$

内摩擦角：

$$(\varphi)_m = (\varphi)_o \quad (10)$$

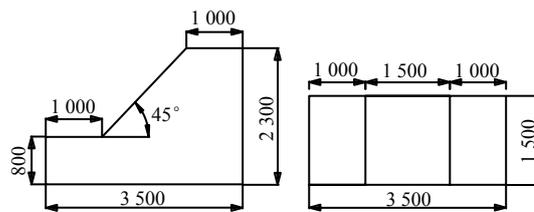
泊松比：

$$(\mu)_m = (\mu)_o \quad (11)$$

2.3 试验平台的制作

本试验使用单坡平台及双坡平台，2 个平台的基本尺寸如图 1、2 所示。

在试验平台的底部放置等间距的槽钢，槽钢置于预先浇注完成的基础槽内。试验时，将基础槽内注满一定的水，水位以没过试验平台底边线为准(总深度约为 11 cm)，将导爆索及起爆雷管缠绕于 $\varphi 10 \text{ mm} \times 1.6 \text{ m}$ 的钢筋上，穿入槽钢的内部以实现水下爆破。通过改变缠绕于钢筋上的药量及穿入槽钢的钢筋根数，可以模拟不同的地震烈度及不同的地震波入射方向。

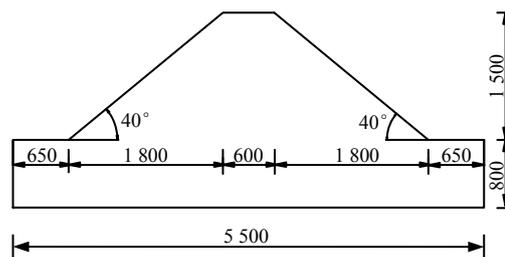


(a) 单坡试验平台几何尺寸 (mm)



(b) 试验平台立体图

图 1 单坡试验平台侧视图、俯视图及立体图
Fig.1 Single-slope test platform side view, top view and stereogram



(a) 双坡试验平台几何尺寸 (mm)



(b) 试验平台立体图

图 2 双坡试验平台侧视图及立体图
Fig.2 Dual-slope test platform side view and stereogram

2.4 边坡模型(覆盖层)的制作

边坡模型的制作方法：试验开始前，将工程上用的粒径为 1~2 mm 的砂土由上至下自然堆积到已经制作好的试验平台(基岩)上，坡顶土层厚为 2 cm，坡脚厚为 20 cm。

2.5 自然基覆边坡试验

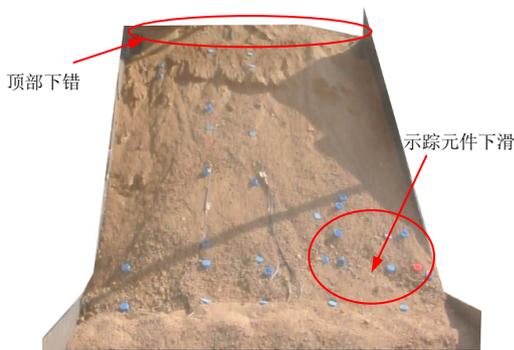
自然基覆边坡试验前后对比如图 3 所示。

表3 基覆边坡不同覆盖层材料试验组次
Table 3 Bedrock and overburden layer slope's different overburden materials' test groups

覆盖层类别	试验组数	每组次数	药量变化范围 /g	试验平台	材料特性描述
砂土	10	6	1~30	单坡及双坡	粒径 1~2 mm



(a) 试验前



(b) 试验后

图3 试验前后对比

Fig.3 Comparison of pre and post of the test

对比分析：地震作用下，覆盖层为砂土时，坡体表面发生流坍；另外，根据观察统计，砂土出现大范围破坏时的药量为 20~30 g。

2.6 带支挡结构的基覆边坡试验

宇宫庙滑坡东侧支挡结构为桩板墙，几何参数如表 4。西侧为重力式挡土墙。出露在马路以上部分，挡土墙几何尺寸（宽×高）为 1.0 m×2.5 m，系由浆砌片石加水泥砂浆素面抹灰而成。

表4 桩板墙物理参数一览表
Table 4 Pile wall's physical parameters

支护方式	几何尺寸 (长×宽×高) /m	埋入深度 /m	数量 / 个	平均间距 /m	材料	备注
桩	2.0×1.5×5.0	5.0	7	6.0		出露在马路以上部分
板	4.5×0.2×1.0		6		钢筋混凝土	

(1) 整体布局及支挡结构设计
宇宫庙滑坡的断面图如图 4 所示。

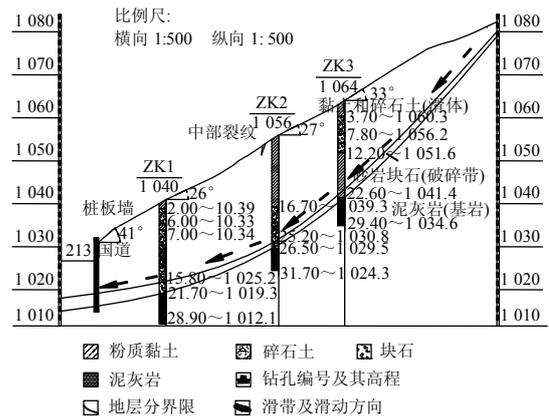


图4 宇宫庙滑坡断面图

Fig.4 Yugongmiao temple landslide's sectional drawing

试验时采用工程砂土模拟基岩上部的覆盖层，砂土尺寸为 1~2 mm 左右，基覆边坡的试验模型图如图 5 所示，立体图如图 6 所示。

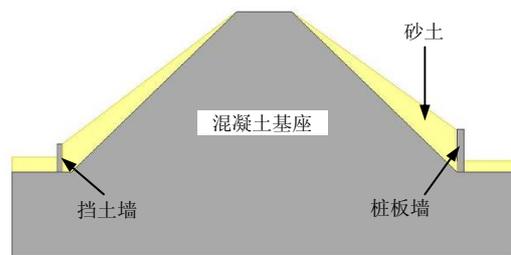
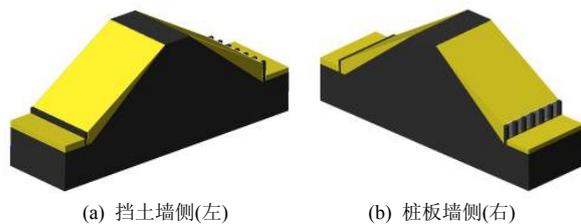


图5 基覆边坡模型示意图

Fig.5 Bedrock and overburden layer slope's model sketch



(a) 挡土墙侧(左)

(b) 桩板墙侧(右)

图6 模型挡土墙侧(左)、桩板墙侧(右)示意图

Fig.6 Model sketch of the retaining wall(left) and the pile wall(right)

(2) 传感器布设

① 模型内部压力传感器

在模型浇注过程中，在模型内部预埋入 2 支 PVDF 压力传感器（内压 1、2）用以测量爆炸载荷，作用于模型内部的动载荷特性，其中内压 1 在平台以下 20 cm，内压 2 在平台以上 50 cm。

② 模型正面加速度传感器

为了测量模型正面墙壁不同高度的加速度分布规律，在模型正面墙壁上设置加速度安装支架。

③ 桩板墙处的压力传感器布设

桩板墙上共布置 5 个 PVDF 压力传感器，分别布置于板下部（距底部 5 cm）、板中下部（距底部 9 cm）、板中部（距底部 13 cm）、板中上部（距底部 17 cm）、板上部（距底部 21 cm）。

④ 边坡表面的加速度传感器布设

为了测定基覆边坡表面加速度的变化规律，在边坡表面一定位置安装加速度传感器。岩块上的加速度传感器通过螺杆固定连接，工程砂土中的加速度传感器直接埋入。

⑤ 爆源位置及布设

采用水下爆破技术，水深约为 11 cm。将导爆索及起爆雷管缠绕于 $\varphi 10 \text{ mm} \times 1.6 \text{ m}$ 的钢筋上。本试验采用 2 个爆源同时起爆，雷管绑扎在钢筋中部，导爆索沿钢筋均匀分布。支架及各传感器具体布置请参看图 7。

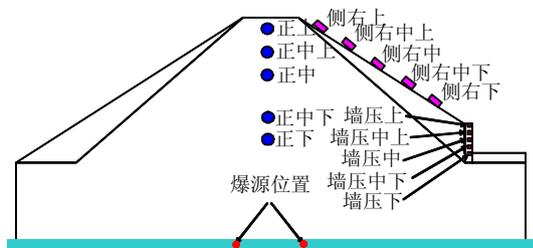


图 7 模型表面传感器安装位置

Fig.7 Sensors' installation locations in the model surface

2.7 试验数据分析

(1) 现场爆炸试验与 5.12 汶川地震真实波形图对比

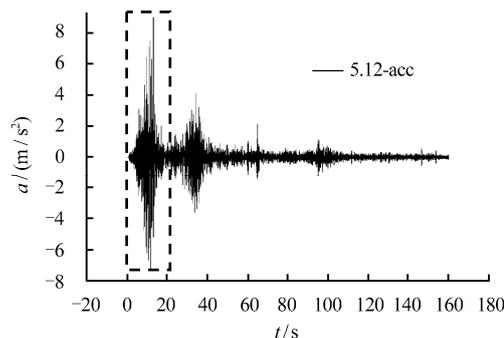
通过对比可以看出：爆炸试验波形图与汶川地震真实波形图相似；经相似率换算得到的试验波持时（约为 13.5 s）与 5.12 汶川波主震持时（约为 20 s）很接近；经相似率换算得到的试验波主频（约为 4.8 Hz）与汶川波主频（约为 5 Hz）也非常接近。总之，持时、主频都相差不大，进而验证了用爆破模拟地震的可行性。

(2) 药量与地震烈度的对应关系

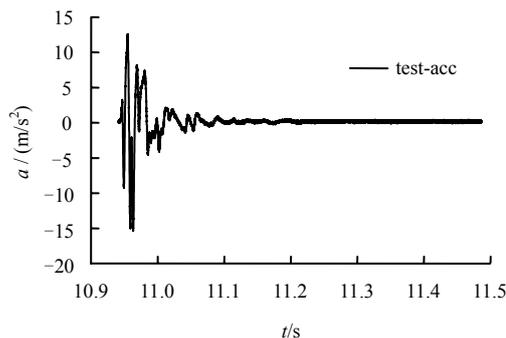
对各组试验各药量下基覆边坡坡体表面加速度进行了统计分析，得出了坡体表面平均振动加速度随药量的变化曲线（如图 10 所示），并用直线进行相应的拟合，给出了拟合公式，如式（12）所示。根据原型与模型的换算关系，可得原型的加速度计算公式如式（13）所示。

$$(a)_m = 1.1Q + 13.6 \quad (12)$$

$$(a)_o = 0.8Q + 9.7 \quad (13)$$

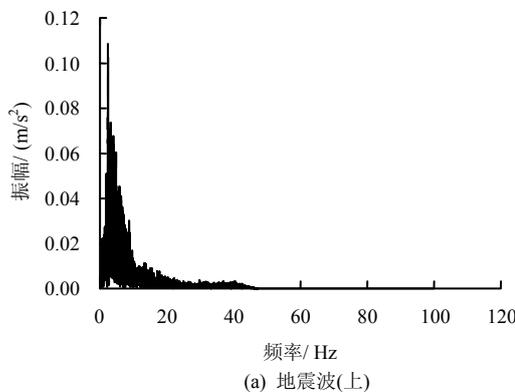


(a) 地震波(上)

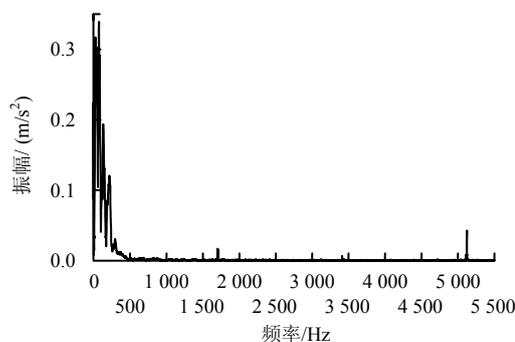


(b) 试验波(下)

图 8 汶川地震波(上)与试验波(下)持时对比
Fig.8 Comparison of Wenchuan seismic wave(up) and the test wave(down) vs. duration



(a) 地震波(上)



(b) 试验波(下)

图 9 汶川地震波(上)与试验波(下)主频对比
Fig.9 Comparison of Wenchuan seismic wave(up) and the test wave(down) vs. main frequency

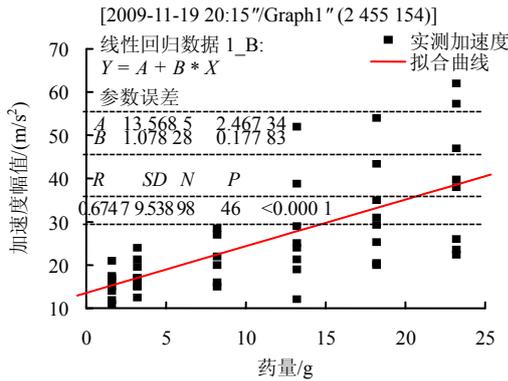


图 10 基覆边坡表层加速度幅值随药量的变化
Fig.10 Bedrock and overburden layer slope's surface acceleration amplitude with the change in dose

式中： a 为振动加速度； Q 为药量。当药量从 1 g 变化到 30 g 时，基覆坡体表面的实测加速度将从 15 m/s^2 变化到 47 m/s^2 ，而对应的地震烈度从 VI 度变化到了 VIII 度。

图 10 中数据离散性较大，这与每次试验时爆源位置、水位高度的差异、坡体在高烈度下的滑移（无法满足小变形假设）等有一定的关系。

(3) 斜坡表面法向加速度分析

在覆盖层为砂土的基覆边坡表面布设加速度传感器，测量其表面的法向加速度，其典型的加速度振动时程曲线如图 11 所示，其他加速度传感器的波形基本类似。由此可得，坡体表面的加速度存在 2 次比较大的峰值，第 1 次峰值是由于爆炸波在岩土交界面处产生反射，将上部松散砂土抬起时产生的加速度；第 2 次是由于被抬起后的砂土在自重作用下下落，撞击到岩土交界面处产生的加速度。

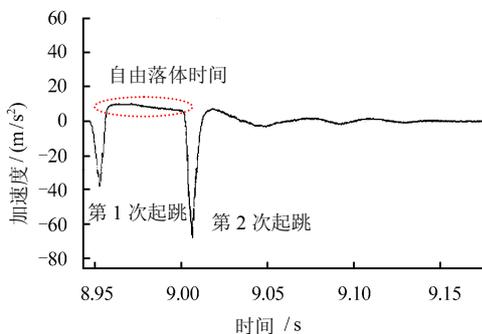


图 11 砂土表面典型振动曲线
Fig.11 Typical vibration curve of the sandy soil surface

各药量下距坡脚 80 cm 处传感器测得的自由落体时间随药量的变化如图 12 所示。由图可知，随着药量的增加，自由落体的时间逐渐增加。

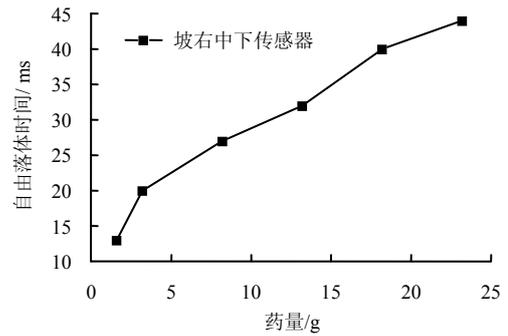


图 12 距坡脚 80 cm 处自由落体时间随药量的变化
Fig.12 Trends of the free-fall time with the change in dose at the 80 cm away from the foot of the slope

图 13、14 给出了拾升时冲击加速度及下落后冲击加速度随着药量及到坡脚距离的变化规律。由图可知，第 1 个峰值及第 2 个峰值均随着药量的增加而逐渐增加。

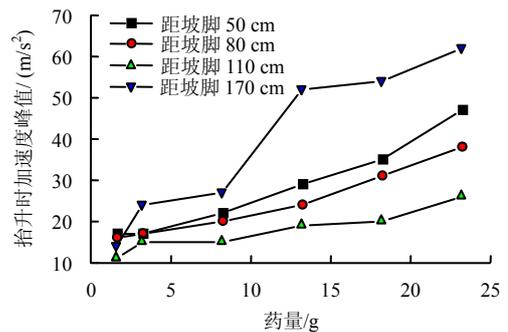


图 13 拾升时加速度峰值随药量的变化趋势
Fig.13 Trends of the acceleration amplitude with the change in dose when uplifted

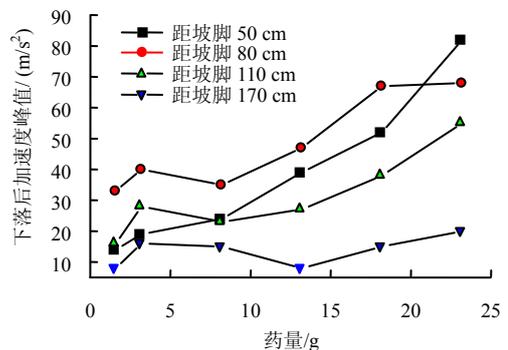


图 14 下落后加速度峰值随药量的变化趋势
Fig.14 Trends of the acceleration amplitude with the change in dose after falling

(4) 重力式挡土墙上土压力的分布规律

挡土墙上土压力正峰值随着药量的变化及随着挡土墙高度的变化如图 15、16 所示。

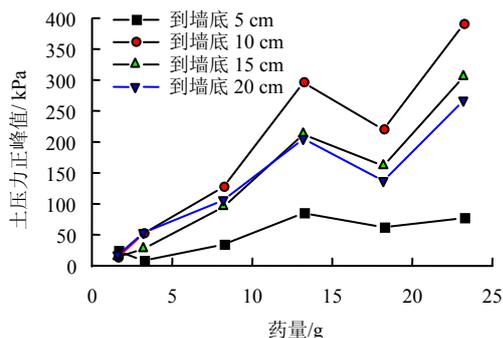


图 15 土压力正峰值随着药量的变化趋势
Fig.15 Trends of the soil pressure's positive amplitude with the change in dose

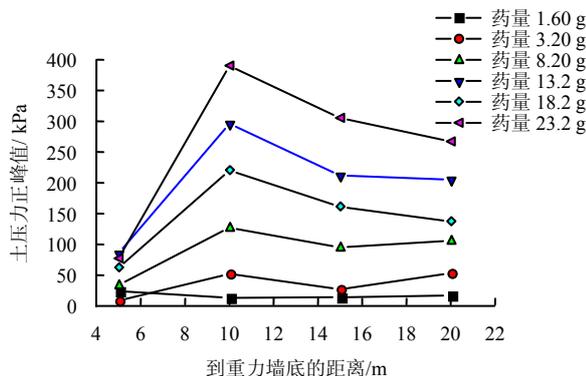


图 16 土压力正峰值随着墙高的变化趋势
Fig.16 Trends of the soil pressure's positive amplitude with the wall's height

由图可知，随着药量的增加，挡土墙上各压力传感器的正峰值基本呈增加趋势，在药量为 18.2 g 时发生了局部转折，表明此时的覆盖砂土层已经产生了局部的破坏。随着墙高的增加，动土压力正峰值基本呈中间大、两头小的钟形，且药量越大，此种规律越明显。这可能表明，挡土墙上钟形分布的规律可能与形成的潜在滑动面有关。小药量下，由于没有形成滑动面，各墙高处的压力值基本相等，而一旦滑面形成，钟形分布的土压力模式便出现。

(5) 桩板墙上土压力的分布规律

对各药量下桩板墙上土压力的正压峰值进行统计分析，土压力峰值随着药量及板高的变化如图 17、18 所示。

由图可知，随着药量的增加，桩板墙上各压力传感器的压力峰值总体上呈现增加的趋势；随着板高的增加，土压力峰值则呈现出先增大后减小的趋势，换句话说，随着到板底距离的增加，土压力峰值基本呈中间大两头小的钟形分布。

2.8 支挡结构效果

对于基覆边坡而言，支挡结构（桩板墙、重力式挡土墙等）具有不可替代的作用。图 19、20 的对

比试验给出了很好的证明。

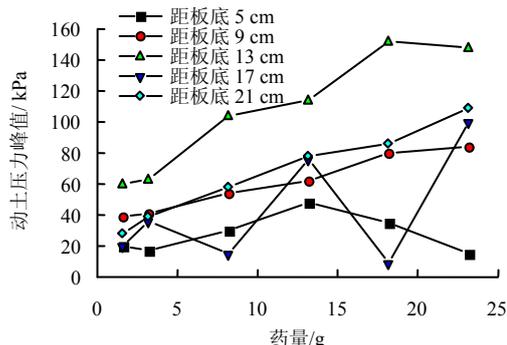


图 17 土压力峰值随药量的变化趋势
Fig.17 Trends of the soil pressure's amplitude with the change in dose

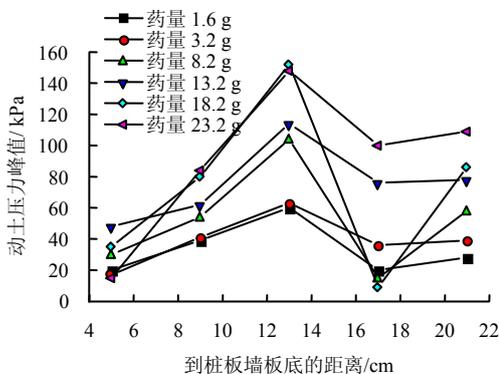


图 18 土压力峰值随板高的变化趋势
Fig.18 Trends of the soil pressure's amplitude with the board's height



图 19 自然边坡一侧
Fig.19 The side of natural slope



图 20 有桩板墙的一侧
Fig.20 The side of the pile wall

通过对比可以看出,在相同药量下,自然边坡一侧(没有支挡)表层的标记物大量下滑,而有桩板墙的一侧,由于有下部桩板墙的支挡作用,松散砂土体受到了一定的约束,只产生了轻微的滑动(从图中的标记物可以看出);但两者也有共性:即两类坡体的后缘均有将近10 cm的整体下错。

3 结论与展望

(1) 破坏现象:对于覆盖层为砂土的自然基覆边坡,地震力作用下的主要破坏现象是浅表层大量松散岩土体翻滚下落,形成表面流坍,并最终聚集于坡脚。这一现象与汶川地震现场调查的破坏现象相符。

(2) 破坏模式:距震源很近(即近场)且地震烈度为VI至VIII度之间时,基覆边坡一般不会发生崩塌或者大面积滑坡,破坏模式主要是浅表层张拉而导致表层松散体流坍。原因是应力波作用下,黏聚力及抗拉强度的丧失,最终在自重作用下发生滑移。

(3) 药量与地震烈度的关系:当药量从1 g变化到30 g时,基覆边坡坡体表面加速度将从 15 m/s^2 变化到 47 m/s^2 (拟合公式为:式(12)),通过相似率换算,对应的地震烈度将从VI度变化到VIII度。

(4) 支挡结构的作用:重力式挡土墙及桩板墙等支挡结构对基覆边坡具有很好的支挡效果。支挡结构提供了支撑面,约束了基岩上部覆盖层的整体位移,在一定程度上减弱了原有的剪出临空面。

(5) 重力的影响:在爆破瞬间,由于地震波传播产生的动土压力远大于静止土压力,因此,此过程可以不考虑坡体自重的影响;但在爆破后,由于在重力的作用下坡体表面发生流坍,并对支挡结构(桩板墙、挡土墙)产生压力,此时的重力又是不可忽视的。因此,在整个试验过程中,要对重力的影响从不同的角度来考虑。

(6) 工程意义:为防止基覆边坡表层流坍导致的道路掩埋,对于铁路和公路选线,应尽量避免通过高陡基覆边坡的密集区,若必须通过,可在坡体表层设置主动及被动防护网,同时在坡脚处设置挡土墙、桩板墙等支挡结构。

(7) 试验展望:一方面,今后对于试验模型,可以结合现场工况选取更加“相似”的材料,进一步满足相似率的要求,以达到相对理想的效果;另一方面,对于滑坡面形状,考虑到现有的模型(直线型)是对宇宫庙滑坡进行了简化,今后会尽量选用弧形坡面,同时会兼顾到基岩与滑坡体的接触面性质,进而更好地模拟真实的滑坡。

参考文献

- [1] 郑颖人,叶海林,黄润秋.地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J].岩石力学与工程学报,2009,(8):1714-1723.
ZHENG Ying-ren, YE Hai-lin, HUANG Run-qiu. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, (8): 1714-1723.
- [2] 娄国充,王树栋.地震作用下土质边坡可靠度分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(A01):4877-4880.
LOU Guo-chong, WANG Shu-dong. Reliability study on earth slopes under earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(A01): 4877-4880.
- [3] 于玉贞,邓丽军,李荣建.砂土边坡地震动力响应离心模型试验[J].清华大学学报(自然科学版),2007,47(6):789-792.
YU Yu-zhen, DENG Li-jun, LI Rong-jian. Centrifuge model test of seismic response behavior of a sand slope[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2007, 47(6): 789-792.
- [4] 苏栋,李相菘.砂土自由场地震响应的离心机试验研究[J].地震工程与工程振动,2006,26(2):166-170.
SU Dong, LI Xiang-song. Centrifuge modeling of seismic response of free sand ground[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2006, 26(2): 166-170.
- [5] 吴俊贤,倪至宽,高汉核.土石坝的动态反应:离心机模型试验与数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2007,26(1):1-14.
WU Chun-hsien, NI Chin-kuan, KO Hon-yim. Seismic reaction of earth and rockfill dam: Centrifuge modeling test and numerical simulation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(1): 1-14.
- [6] 徐光兴,姚令侃,高召宁,等.边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(3):624-632.
XU Guang-xing, YAO Ling-kan, GAO Zhao-nin, et al. Large-scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic responses of slope[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3): 624-632.
- [7] 王燕华,程文滚,陆飞,等.地震模拟振动台的发展[J].工程抗震与加固改造,2007,29(5):53-56,67.

- WANG Yan-hua, CHENG Wen-gun, LU Fei, et al. Development of the shaking table[J]. **Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting**, 2007, 29(5): 53—56, 67.
- [8] 沈德建, 吕西林. 地震模拟振动台及模型试验研究进展[J]. 结构工程师, 2006, 22(6): 55—58, 63.
- SHEN De-jian, LÜ Xi-lin. Research advances on simulating earthquake shaking tables and model test[J]. **Structural Engineers**, 2006, 22(6): 55—58, 63.
- [9] 尹谦钧, 侯杰, 邱法维. 地震模拟振动台的基础设计研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(4): 40—44.
- YIN Qian-jun, HOU Jie, QIU Fa-wei. Research on designing method of shaking table foundation[J]. **Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting**, 2009, 31(4): 40—44.
- [10] 禹莹, 李德玉, 魏力. 大型地震模拟振动台的结构与应用[J]. 应用天地, 2007, 26(9): 45—48.
- YU Ying, LI De-yu, WEI Li. Structure and application of huge earthquake simulation vibration plate[J]. **Application of Heaven and Earth**, 2007, 26(9): 45—48.
- [11] 王燕华, 程文溱. 地震模拟振动台系统性能分析[J]. 特种结构, 2009, (5): 116—118.
- WANG Yan-hua, CHENG Wen-xiang. Shaking table system performance analysis[J]. **Special Structures**, 2009, (5): 116—118.
- [12] 黄宝锋, 卢文胜, 宗周红. 地震模拟振动台阵系统模型试验方法探讨[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 46—52.
- HUANG Bao-feng, LU Wen-sheng, ZONG Zhou-hong. Study on model experimental methodology utilizing the multiple earthquake simulation shake table system[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2008, 41(3): 46—52.
- [13] 李海洋, 王向英, 田石柱. 地震模拟振动台子结构混合试验方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(2): 75—80.
- LI Hai-yang, WANG Xiang-ying, TIAN Shi-zhu. Real time dynamic hybrid testing method for seismic simulation shaking tables[J]. **Journal of Architecture and Civil Engineering**, 2009, 26(2): 75—80.
- [14] LIN M L, WANG K L. Seismic slope behavior in a large-scale shaking table model test[J]. **Engineering Geology**, 2006, 86(2—3): 118—133
- [15] CHAU K T, SHEN C Y, GUO X. Nonlinear seismic soil-pile-structure interactions: Shaking table tests and FEM analyses[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2009, (29): 300—310
- [16] LI Jie, CHEN Hua-ming, CHEN Jian-bing. Studies on seismic performances of the prestressed egg-shaped digester with shaking table test[J]. **Engineering Structures**, 2007, (29): 552—566.
- [17] SAMAN Z, BATHURST R J. Influence of constitutive model on numerical simulation of EPS seismic buffer shaking table tests[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2009, (27): 308—312.
- [18] 尚守平, 余俊, 王海东, 等. 爆破模拟地震研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(1): 24—27.
- SHANG Shou-ping, YU Jun, WANG Hai-dong, et al. Study on blasting vibration simulating earthquake[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2007, 4(1): 24—27.
- [19] 国胜兵, 潘越峰, 高培正, 等. 爆炸地震波模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 335—340.
- GUO Sheng-bing, PAN Yue-feng, GAO Pei-zheng, et al. Numerical simulation of explosion seismic waves[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2005, 25(4): 335—340.
- [20] 张雪亮, 黄树棠. 爆破地震效应[M]. 北京:地震出版社, 1981.
- [21] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2007.
- [22] 罗先启, 葛修润. 滑坡模型试验理论及其应用[M]. 上海:中国水利水电出版社, 2008.
- [23] 张敏政. 地震模拟试验中相似律应用的若干问题[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(2): 52—58.
- ZHANG Min-zheng. Study on similitude laws for shaking table tests[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1997, 17(2): 52—58.
- [24] 左保成, 陈从新, 刘才华, 等. 相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1805—1808.
- ZUO Bao-cheng, CHEN Cong-xin, LIU Cai-hua, et al. Research on similar material of slope simulation experiment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(11): 1805—1808.
- [25] 王汉鹏, 李术才, 张强勇, 等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1842—1847.
- WANG Han-peng, LI Shu-cai, ZHANG Qiang-yong, et al. Development of a new geomechanical similar material[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(9): 1842—1847.